



УДК 621.3

## **ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ И РЕЗОНАНСНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ**

## **APPLICATION COMPENSATING DEVICES AND RESONANT FILTERS TO SUPPRESS THE VOLTAGE HIGHER HARMONICS IN THE ELECTRIC GRID**

**Антипин Александр Сергеевич**, магистрант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.s\_antipin@mail.ru. Тел.: +7(982)702-44-52

**Фризен Василий Эдуардович**, д-р. техн. наук, заведующий каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vfrizen@yandex.ru

**Удинцев Владимир Николаевич**, канд. техн. наук, доцент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: uvn21@ya.ru

**Назаров Сергей Леонардович**, канд. техн. наук, доцент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**Alexander S. Antipin**, Master student, Department «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.s\_antipin@mail.ru. Ph.: +7(982)702-44-52

**Vasiliy E. Frizen**, Doctor Sc., Department Chairman «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vfrizen@yandex.ru

**Vladimir N. Udintsev**, Cand. of Sc., Associate Professor at the Department of «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: uvn21@ya.ru

**Sergei L. Nazarov**, Cand. of Sc., Associate Professor at the Department of «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia.

**Аннотация:** В статье обосновывается целесообразность применения компенсирующих устройств, в том числе конденсаторных батарей и резонансных фильтров высших гармоник. Описаны особенности применения данных устройств при комплексном использовании. Описана схема разработанных фильтров, приведены результаты сравнения применяемых компенсирующих устройств. Проведены расчеты по нахождению величин тока основной гармоники нагрузки и фильтра.

**Abstract:** The article proves the feasibility of compensating devices, including capacitor banks and harmonic filter resonance. The features of the application of these devices with the integrated use. The scheme developed by the filters, given the results of comparison used compensating devices. The calculations for finding the values of the fundamental harmonic current load and filter.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии; гармоники напряжения; компенсирующие устройства; фильтр высших гармоник; конденсаторные батареи.

**Key words:** power quality; voltage harmonics; compensating devices; filter of higher harmonics; capacitor batteries.

## ГАРМОНИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Электрические сети в современный период все более подвергнуты так называемым гармоническим «загрязнениям», которые вызывают нежелательные последствия. Характерным, на сегодняшний день, является значительное увеличение находящихся в эксплуатации электронных устройств: колоссальное количество персональных компьютеров, источников бесперебойного питания и другого электронного оборудования, в которых используются малогабаритные импульсные источники питания. Кроме того, получили широкое распространение такие мощные электронные устройства, как электронные регуляторы скорости, зарядно-выпрямительные устройства и др. Они представляют собой существенно нелинейную электрическую нагрузку и вызывают искажения синусоидальной формы кривых напряжения и тока, что приводит к возникновению гармонических «загрязнений» электрической сети. По этой причине в настоящее время электрические сети практически всех производственных предприятий и офисных зданий в той или иной степени «загрязнены».

Гармонические «загрязнения» электросетей могут приводить к целому ряду повреждений электротехнического оборудования и к нанесению значительного ущерба технологическим процессам, главными из которых являются следующие: выход из строя конденсаторов, используемых для улучшения  $\cos\varphi$  электросети, а также в электролюминесцентных светильниках; выход из строя в результате перегрева нулевых проводов из-за того, что в них суммируются токи всех третьих гармоник, при этом ток нулевого провода может более чем в два раза превысить номинальное значение фазного тока; перегрев

мощных силовых трансформаторов, электродвигателей, питающих проводов и электрических кабелей; искажения электромеханических характеристик электродвигателей; ложное срабатывание устройств токовой релейной защиты, перегрев предохранителей, ложное срабатывание защиты из-за наличия токов утечки; повреждение межобмоточной изоляции в трансформаторах и электродвигателях; недостоверные показания измерительных приборов и некоторых датчиков обратной связи в системах автоматизации технологических процессов [1].

Высшими являются гармоники, соизмеримые по величине с фундаментальной. Наиболее значимыми считаются 3, 5, и 7-я гармоники. Конденсаторы особо чувствительны к гармоникам тока, поскольку их полное сопротивление уменьшается пропорционально порядку гармоники. Это приводит к перегрузке конденсатора, непрерывно сокращающей его срок службы.

## КОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Для компенсации высших гармоник могут применяться различного типа фильтры высших гармоник. Применение LC-фильтров, настроенных на определенный порядок гармоник, на входе трехфазного выпрямителя при 100%-й нагрузке обеспечивает снижение коэффициента искажения тока до величины 8–10%. Значения этого коэффициента в системе без фильтра может достигать 30% и более [2]. Улучшить показатели напряжения в сетях возможно путем применения такого перспективного метода, как настройка значений и частоты гармоник в работе преобразователей через специализированные силовые резонансные фильтры.

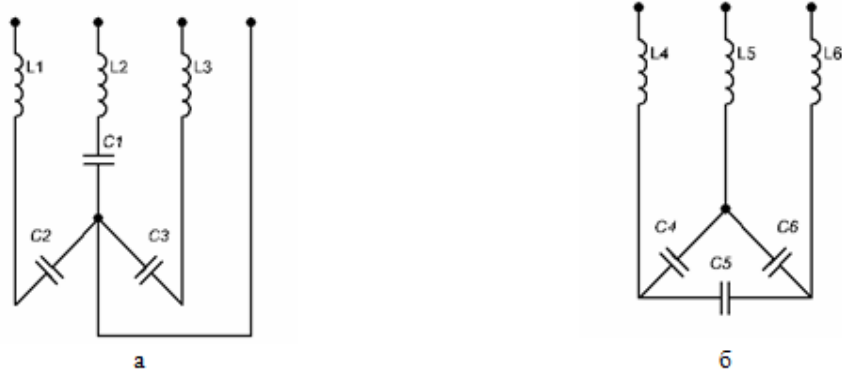


Рис. 1. Схема соединения фильтров высших гармоник:

а - звезда с нулем для 3 гармоник; б - треугольник для 5 гармоник

Таблица 1. Гармоники напряжения и коэффициенты искажения

№	$I_T, A$	$\cos\varphi$	Гармоники напряжений в % от 1								$THD(u)$	$THD(i)$	$TDD(i)$
			3	5	7	9	11	13	15	17			
1	0,63	0.89	99	20	10	5,6	6,6	3,1	1,2	2,1	99	10	33
2	0.63	0.98	80	5,5	2,1	2,4	1,1	0,5	0	0,4	81	26	10
3	0.66	1	2,3	0,8	2,7	1,7	5,3	5,3	0,7	2,3	8,9	40	15
4	0.64	0.99	2,3	1	2,6	1,6	3,7	2,8	0,7	3,8	8,4	40	15

По закону Ома, параметры тока, протекающего по цепи, зависят от ее сопротивления. В сетях с индуктивным сопротивлением импеданс с частотой увеличивается, тогда, как сопротивление конденсатора снижается, что вызывает увеличение потоков, проходящих через системы конденсаторов и других потребителей. Соответственно, эффективность определяется уровнем его реактивной мощности, точностью настройки и показателями импеданса в точке подключения [3].

Одним из самых оптимальных вариантов решения данных задач стали силовые фильтры высших гармоник резонансного вида. Чтобы обеспечить правильную и надежную работу электроустановки, при выборе компенсирующего оборудования следует учитывать уровень гармоник. Более точную оценку уровня гармоник можно сделать с помощью измерений. Существенными показателями являются суммарный коэффициент гармоник тока  $THD(i)$  и суммарный коэффициент гармоник напряжения  $THD(u)$ , измеренные на вторичной обмотке силового трансформатора до подключения конденсаторов. *Total Harmonic Distortion* – общее гармоническое искажение, которое выражается в процентах. Коэффициент гармонических искажений с учетом максимально потребляемого тока за определенный период  $T$  –  $TDD\%$  (*Total Demand Distortion*). Понятие «коэффициент искажения синусоидальности тока» характеризует

степень отклонения формы периодической кривой тока от синусоидальной. В соответствии с ГОСТ 13109-97 [4] установлены допустимые значения и формулы для нахождения коэффициентов искажения.

Один из разновидностей силового фильтра был сконструирован специалистами кафедры «ЭЭС» УрФУ для изучения процессов в модулируемом физическом оборудовании лаборатории при значительных величинах 3-й и 5-ой гармоники. Он представляет собой устройство, имеющее специальную конструкцию, выполненная из стеклотекстолита и магнитных сердечников, с использованием блоков конденсаторов, которые располагаются параллельно магнитопроводам на изоляционном материале. От непредвиденного проникновения извне вся конструкция помещается в пластиковый ударопрочный бокс.

На рис. 1. приведены схемы разработанных трехфазных LC-фильтров, настроенные на 3-ю и 5-ю гармонику. Фильтры содержат продольные индуктивности  $L1 - L6$  и цепь из конденсаторов  $C1 - C6$ , настроенных на определенную гармонику. Для фильтра 3-й гармоники, каждая емкость фазы настраивалась для достижения резонанса при помощи генератора частот. Величина емкости конденсаторов между фазами 5 гармоники собранного треугольником по сравнению со звездой в три раза меньше.

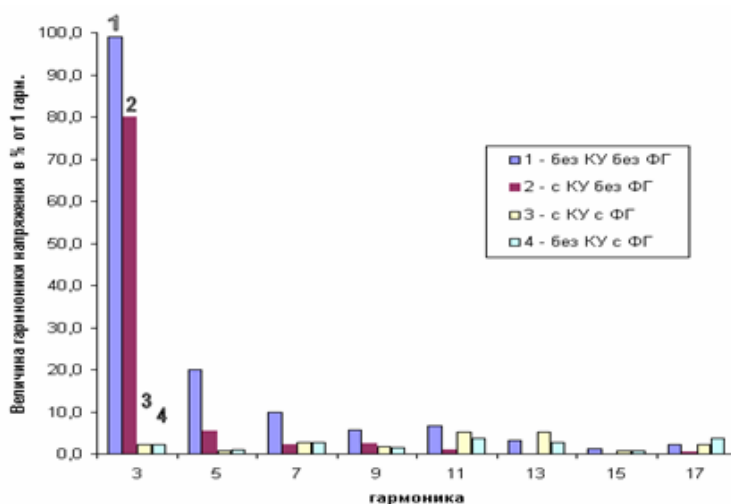


Рис. 2. Гистограмма гармоник напряжения на шинах трансформатора

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные данные гармоник тока

№	$I_T$ , А	Ток нагрузки				$K_{И}$	Ток фильтра				$K_{И}$
		$I_{\Sigma}$	$THD(i)$	$I_{\Sigma \text{ ф.м.}}$ , А	$I_{(1)}$ , А		$I_{\Sigma}$	$THD(i)$	$I_{\Sigma \text{ ф.м.}}$ , А	$I_{(1)}$ , А	
1	0,63	0,34	0,1	0,034	0,338	0,995	-	-	-	-	-
2	0,63	0,41	0,26	0,106	0,396	0,966	-	-	-	-	-
3	0,66	0,4	0,22	0,088	0,390	0,976	0,39	0,4	0,156	0,357	0,917
4	0,64	0,44	0,23	0,101	0,428	0,973	0,4	0,4	0,16	0,367	0,917

В лаборатории были проведены испытания данных фильтров высших гармоник (ФГ), конденсаторной установки (КУ) и оценка их эффективности в плане подавления гармоник, компенсации реактивной энергии, на которые они были рассчитаны. Фильтры и конденсаторная установка подключались к нагруженному трансформатору согласно вариантам: №1 - без КУ, без ФГ; №2 - с КУ, без ФГ; №3 - с КУ, с ФГ; №4 - без КУ с ФГ.

#### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Используя измерительные приборы марки *SATEC 130 plus*, проведены измерения гармоник, коэффициентов искажения тока и напряжения на шине трансформатора, данные занесены в таблицу 1 и 2. Ток на шинах трансформатора  $I_T$  изменялся от 0,63 до 0,66 А. По данным таблицы 1, была построена гистограмма гармоник напряжения рис. 4. С помощью использования полупроводниковых схем выпрямления, величина 3-й гармоники в опыте №1 составила 99%. В следующем эксперименте при подключении конденсаторной установки на полную допустимую мощность, данный показатель снизился до 80%, величины гармоник с 5 – 17 по сравнению с первым опытом уменьшились приблизительно в 5 раз. Присоединив фильтры в опыте №3, величины с 3-ей по 9-ой гармоник не превышали 3%, при этом увеличилась составляющая 11 и 13, а отключение КУ внесло обратный эффект, уменьшив данные показатели. В опыте № 3, КУ была отрегулированная на малую часть своей допустимой мощности, с целью поддержания  $\cos\varphi$  в пределах 1.

Проведены расчеты величин тока основной гармоники нагрузки и фильтра, данные приведены в табл. 2. Суммарный действующий ток высших гармоник можно определить по формуле:

$$I_{\text{гарм}} = I \cdot THD(i), \quad (1)$$

где  $THD(i)$  – коэффициент искажения синусоидальности тока;

$I$  — действующий ток приемника.

Ток основной гармоники можно определить следующим образом:

$$I_{(1)} = \sqrt{I^2 - I_{\text{гарм}}^2}. \quad (2)$$

Коэффициент искажения кривой тока составит:

$$K_{(И)} = I_{(1)} / I. \quad (3)$$

Анализируя, полученные расчетным путем, данные из таблицы 2, можно сделать вывод, применения по отдельности компенсирующие устройства, конденсаторная установка создает наибольший суммарный ток гармоник нагрузки и обладает наименьшим коэффициентом искажений кривой тока. Применение конденсаторных установок лишь частично решает проблему по подавлению гармоник, в то время как фильтры успешно справляются с данной задачей и увеличивают  $\cos\varphi$  до 1. Комплексное применение компенсирующих устройств является наиболее оптимальным решением в данном случае, возможность полностью подавлять определенные искажения в сети и поддерживать  $\cos\varphi$  близким к 1, при использовании конденсаторов малой емкости, повышает надежность и качество энергоснабжения электротехнологических установок при минимальных затратах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качество электроэнергии. Современные технологии // ООО "Альтернативная энергетика РО" [Электронный ресурс]. Дата обновления: 06.04.2016. — URL: [http://www.ae-ro.ru/quality\\_of\\_electric\\_grid.html](http://www.ae-ro.ru/quality_of_electric_grid.html)
2. Зельцбург Л. М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / Л. М. Зельцбург. — М.: Высшая школа, 1973.
3. Конденсаторные установки. Фильтры гармоник // Мегавар [Электронный ресурс]. Дата обновления: 06.04.2016. — URL: <http://megavarm.ru/produkciya/>
4. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М., 2006. 29 с